

допускаемых:

- для жесткой опоры $\frac{\Delta f}{L} = 0,0014 < 0,003$;
- для шарнирной опоры $\frac{\Delta f}{L} = 0,0022 < 0,003$.

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученные в первом приближении результаты расчета металлоконструкции перегружателя свидетельствуют о том, что все элементы металлоконструкции удовлетворяют условию прочности и деформативности. В дальнейшем необходимо провести более детальный расчет, используя конечные элементы в виде пластин.

Список литературы. 1. Беглов Б.В. Мостовые перегружатели / Б. В. Беглов, П.И. Кох. – М.: Машиностроение, 1974. – 223 с. 2. ПК ЛИРА. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций / Под. ред. академика АИН Украины А. С. Городецкого. – К.: Машинознавство, 2003. – 464 с.

Поступила в редколлегию 06.05.2006.

УДК 539.3:621.98

Н.А. ДЕМИНА, Таврийская государственная агротехническая академия, г. Мелитополь

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАТКИ

Запропонована нова багаторівнева структура комплексної математичної моделі напружено-деформованого стану елементів штампової оснастки. Розроблено структуру програмно-модельного комплексу для багатоваріантних досліджень процесів у технологічній системі холоднолистової штамповки.

The new multilevel structure of complex mathematical model of stressed-deformed state of elements of the stamp rigging is offered. The structure of programmatic-model complex is developed for multiple researches of processes in the technological system of cold stamping.

Состояние вопроса. Холоднолистовая штамповка [1, 2] является одним из наиболее прогрессивных технологических процессов, который обеспечивает оперативность и низкую стоимость технологической подготовки производства (ТПП) новых изделий, особенно при применении переналаживаемых штампов. При этом одним из основных вопросов является обеспечение прочности, жесткости, стойкости пуансонов, матриц, пуансон-матриц штампов. Этому вопросу посвящено

большое количество аналитических, численных и экспериментальных исследований, результаты которых достаточно точно отражены и обобщены в работе [3]. В то же время описанные ранее математические модели не отражают всех сторон исследуемого процесса, особенно с точки зрения описания контактного взаимодействия и процесса разделения штампуемого материала. Это обстоятельство и выдвигает актуальную и важную задачу разработки математической модели напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов штамповой оснастки, свободной от указанных недостатков. Однако, учитывая большой объем результатов, полученных с использованием ранее разработанных моделей и использованных в практике проектирования разделительных штампов, требуется создание такой модели, которая “выросла” бы из более простой и часто используемой. Этому вопросу, а также разработке структуры программно-модельного комплекса, реализующего создаваемую комплексную математическую модель с применением метода конечных элементов (МКЭ), посвящена данная статья.

Технология исследований. Предлагается следующая технология исследований напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки (рис.1).

Анализ конструкций, технологических параметров и условий эксплуатации элементов штамповой оснастки. Подобный анализ конструкций, условий взаимодействия элементов технологической оснастки и штампуемого материала методами голографической интерферометрии, электротензметрии, фотоупругости описаны в работе [3]. Анализ этого материала позволяет сделать следующие выводы:

- в первом приближении для исследования НДС элементов штамповой оснастки возможно использование упрощенных расчетных моделей;
- уже имеются исходные экспериментальные материалы для идентификации расчетных моделей с учетом контактного взаимодействия;
- отсутствуют (за исключением “живых осциллограмм”) прямые экспериментальные исследования самого технологического процесса вырубки-пробивки на стадии разделения материала;
- наиболее нагруженными и ответственными элементами штампов являются пуансоны, матрицы, пуансон-матрицы и базовые плиты. Это значит, что в первую очередь именно их необходимо рассматривать с точки зрения разработки математических моделей напряженно-деформированного состояния, а также алгоритмического и программно-модельного обеспечения.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки. В соответствии с предлагаемой технологией исследований рассмотрены 3 варианта математических моделей, являющихся составными частями комплексной математической модели НДС

элементов штамповой оснастки.

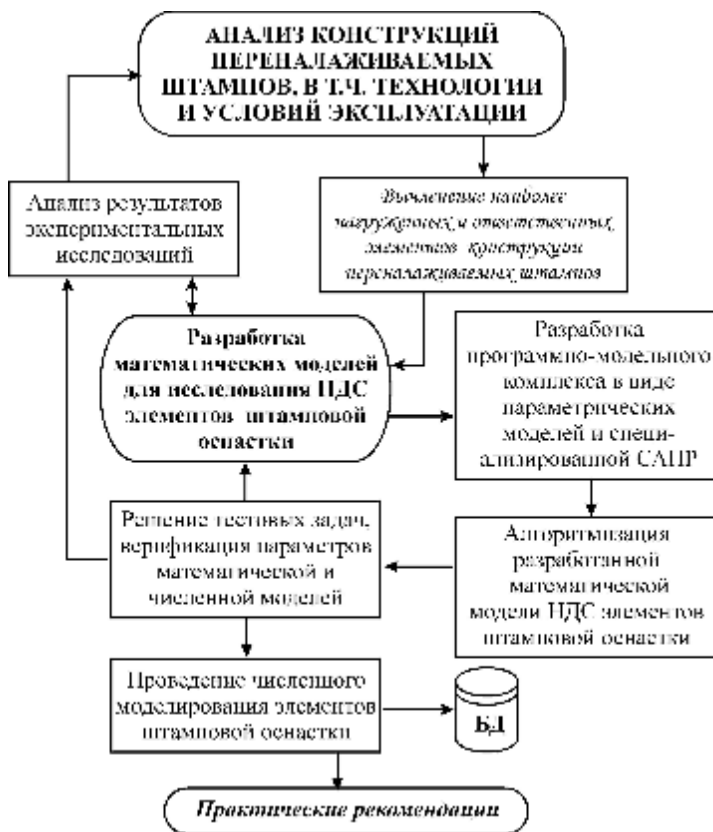


Рис.1. Предлагаемая технология исследований напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки

I. Нижний уровень представляет линейная модель, в которой предполагается известными и заданными законы распределения контактных усилий взаимодействия со штампуемым материалом и друг с другом. В этом случае задача сводится к трехмерной задаче теории упругости для тел с заданными площадками нагружения и известными законами распределения усилий. Так, в работах [3-7] достаточно полно представлен анализ условий нагружения элементов штамповой оснастки путем экспериментальных исследований методами электротензометрии, контактных отпечатков, фотоупругости и лазерной интерферометрии. Полученные результаты находятся в удовлетворительном соответствии с данными, полученными другими исследователями [8-11]. В результате для элементов штамповой

оснастки задаются достаточно простые законы распределения контактных усилий (рис.2).

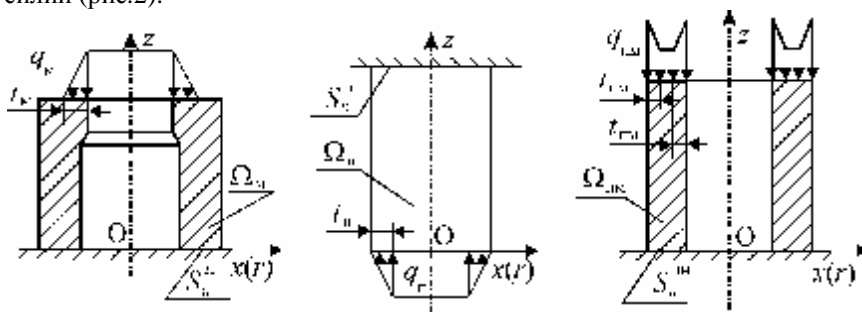


Рис.2. Расчетные схемы матрицы, пуансона и пуансон-матрицы для холоднolistовой штамповки

Система уравнений линейной теории упругости

$$L(u)|_{\Omega} = 0, \quad (1)$$

где L – оператор краевой задачи относительно искомых перемещений $u(\mathbf{r})$ (\mathbf{r} – радиус-вектор текущей точки области Ω , занимаемой исследуемым телом),

дополняется граничными условиями на частях S_u поверхностей пуансона, матрицы и пуансон-матрицы. В осесимметричном случае – это отрезки координатных линий $z = const$ (см. рис.2), с индексами “м” (матрица), “п” (пуансон), “пм” (пуансон-матрица), а также с условиями нагружения на участках в зоне рабочих кромок. На рис.2 приведены эти характерные отрезки: t_m (приложено линейное давление $q_m(r)$), t_p (приложено также линейно распределенное вдоль радиальной координаты давление q_p) и t_{mp}, t_{pm} (приложено кусочно-линейное давление q_{pm} , причем на отрезках t_{mp}, t_{pm} – линейное, вне – примерно постоянное).

Кроме указанных усилий, на режущие части штампов действуют интегрально менее значительные напряжения обжатия боковых поверхностей и еще меньшие тангенциальные напряжения, порождаемые трением [4]. Поскольку законы распределения данных нагрузок носят ярко выраженный локальный характер, причем зоны локализации – режущие кромки, то все эти силовые граничные условия можно сформулировать в терминах “кромочных” координат (рис.3):

$$\sigma_{zr}|_{r' < r'} = q(r'); \quad \sigma_{r'z}|_{z' < z'} = q_p(z'); \quad \tau_{r'z'}|_{z' < z'} = q_\tau(z'). \quad (2)$$

Учитывая, что [1-3]

$$\int_{(S)} (q + q_{\tau}) ds = P_{\text{шт}} , \quad (3)$$

где $P_{\text{шт}} = L_{\text{шт}} \sigma_{\text{ср}} t k_{\text{ш}}$ – усилие штамповки детали периметром $L_{\text{шт}}$ и толщиной t , изготовленной из материала с напряжениями среза $\sigma_{\text{ср}}$;

$k_{\text{ш}}$ – эмпирический коэффициент,

а также

$$\int_{(S)} q_n ds = \alpha \int_{(S)} q ds ; \quad (4)$$

$$q_{\tau} = \beta q_n = \text{const} , \quad (5)$$

можно определить все значимые коэффициенты в аналитических выражениях q , q_n , q_{τ} от координат, от конструктивных и технологических параметров элементов штампов. Здесь α, β – некоторые эмпирические коэффициенты.

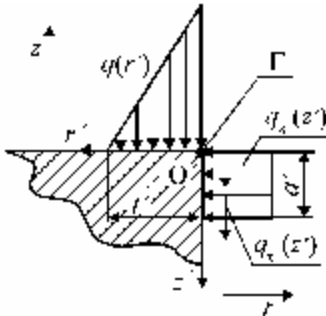


Рис.3. К формулировке силовых граничных условий в системе “кромочных” координат $O'r'z'$:

Γ – режущая кромка;

$q(r')$ – основное усилие штамповки;

q_n, q_{τ} – усилия обжатия и трения

Соотношения (1)-(5) содержат описание классического варианта математической модели напряженно-деформированного состояния элементов штампов для холоднолистовой штамповки материала в системе “кромочных” координат. Незначительные количественные вариации этой модели могут быть вызваны только уточнением распределений q , q_n , q_{τ} , а также некоторых геометрических, силовых и технологических параметров, содержащихся в (2)-(5). Построенная в первом приближении математическая модель не вызывает принципиальных сложностей при последующей алгоритмизации, программной и модельной реализации. Основная же задача при создании, например, специализированной САПР для анализа напряженно-деформированного состояния элементов штампов на основе этой модели состоит в удачной параметризации всего набора значимых факторов.

II. Основной, наиболее заметный недостаток математической модели I состоит в раздельном рассмотрении режущих элементов штампов друг от

друга и от основного элемента технологической системы, их связывающего – от штампуемого материала. На рис.4 приведена схема такого взаимодействия, отнесенная к локальным “кромочным” координатам.

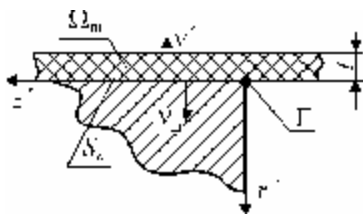


Рис.4. Схема взаимодействия режущего элемента штампа со штампуемым материалом:

$\Omega_{ш}$ – область пространства, занимаемая штампуемым материалом; S_c – зона возможного контактного взаимодействия; V' , $V_{ш}$ – нормали к поверхностям режущего элемента и заготовки соответственно

Тогда, кроме системы уравнений (1), дополненной кинематическими граничными условиями на частях поверхности S_u , добавляются следующие условия на части поверхности возможного контакт (см. рис.4):

$$u_{V'} + u_{V_{ш}} \leq \delta_c, \quad (6)$$

где $u_{V'}$, $u_{V_{ш}}$ – перемещения точек режущего элемента и заготовки по нормальям к поверхностям; δ_c – начальный зазор в сопряжении.

При решении нелинейной задачи (1), (6) получаем не постулируемый заранее закон распределения контактных нагрузок q_c , а искомый закон их распределения в качестве еще одного неизвестного полученной задачи. При этом в качестве параметра нагружения можно взять или величину усилия штамповки

$$\int_{(S_c)} q_c ds = P_{шт}, \quad (7)$$

или величину хода ползуна пресса из некоторой нулевой точки Δ , и тогда

$$u|_{S_u} = \Delta. \quad (8)$$

Соотношение (7) задает силовое нагружение, а (8) – кинематическое.

Несмотря на кажущуюся простоту соотношения (6), заменяющего в данном случае уравнения (2)-(5), получаемая в результате задача становится более сложной, существенно нелинейной, причем в качестве дополнительных неизвестных выступают конфигурации контактных зон и распределения контактных нагрузок. Для решения таких задач используется, в частности, метод вариационных неравенств [12-14], сводящий ее к проблеме минимизации функционала полной внутренней энергии \mathcal{E} исследуемой системы тел на множестве, задаваемом ограничениями (6):

$$\mathcal{E}(u) \rightarrow \min. \quad (9)$$

Кроме перечисленных для варианта I при программной реализации данного варианта математической модели в качестве выходных параметров и данных должны выступать распределения q_c и значения t_m , t_n и t_{nm} . Сама задача анализа становится не только громоздкой, но и качественно сложнее, поскольку переводит задачу анализа напряженно-деформированного состояния в нелинейную постановку.

III. Следующим качественным шагом в формировании более адекватной математической модели напряженно-деформированного состояния элементов исследуемой системы является устранение того факта, что при изучении ее поведения никак не моделируется сам физический процесс, который является основой технологического процесса штамповки – процесс разделения штампуемого материала. В этом случае переходим от линейного оператора L в (1) к нелинейному $L^{(n)}$:

$$L^{(n)}(u, \Delta) = 0, \quad (10)$$

причем в нем присутствует и нелинейность геометрическая [15], и физическая [16], и структурная [17]. Кроме того, в операторе присутствует также параметр процесса Δ (например, ход ползуна прессы), от которого зависит текущее состояние нагруженности системы. Следует отметить, что обычно выбираемый для задания процесса штамповки параметр монотонно меняется во времени:

$$\dot{\Delta} > 0, \forall t > 0 \quad \text{или} \quad \dot{\Delta} < 0, \forall t > 0, \quad (11)$$

т.е., например, имеем случай монотонного активного нагружения без участков разгрузки. Последнее замечание отнюдь не упрощает задачу, поскольку наряду с этим идет сопутствующий процесс разрушения материала, вносящий наибольший вклад в усложнение модели.

Развертывание соотношения (10) требует описания в первую очередь свойств материалов элементов исследуемой системы при упруго-пластическом деформировании и разрушении. Указанные зависимости во многом определяют и качественные, и количественные характеристики исследуемого процесса.

Таким образом, записываемая соотношением (10) модель оказывается наиболее сложной из всех, однако ожидаемо более адекватно описывающей поведение исследуемой системы. При алгоритмической и программной ее реализации в дополнение к характеристикам, отслеживаемым для моделей I и II, появляется необходимость в контроле всех характеристик процесса от величины параметра Δ .

Структура программно-модельного комплекса. В соответствии с описанной выше структурой математической модели строится и программно-

модельная реализация. Она включает, с одной стороны, интегрированные специализированные модули создаваемой САПР, а с другой – параметризованные расчетные модели (при использовании МКЭ – конечно-элементные модели). Посредством интерфейсного модуля эти части программно-модельного комплекса взаимодействуют с универсальными системами САЕ, а также с модулями параметрического анализа (рис.5). В результате может быть создана база данных решений (БД на рис.5), служащая основой для построения базы знаний в области моделирования, анализа и синтеза элементов штамповой оснастки.

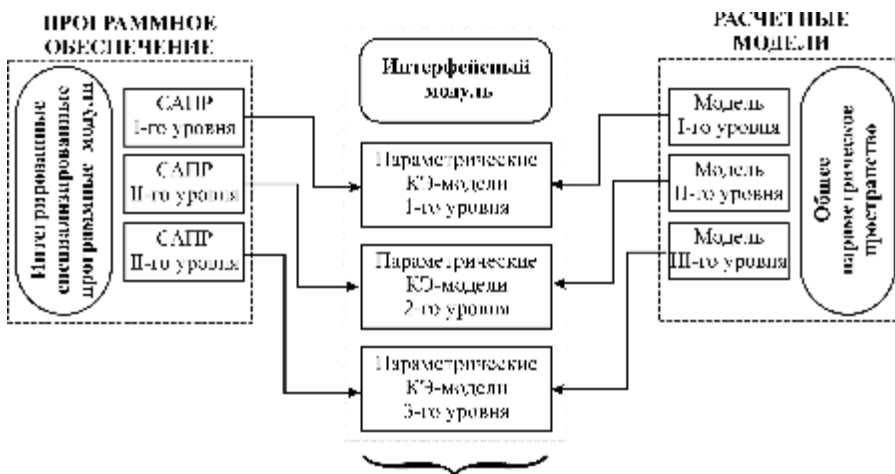


Рис.5. Структура программно-модельного комплекса

Вывод. Предложенный подход отличается от предлагаемых ранее другими исследователями следующими качественными особенностями:

1. Созданные варианты математических моделей повторяют в своем развитии диалектический процесс, реализованный для исследования в данном случае напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки: от простых моделей – к сложным и более адекватно описывающим исследуемый процесс, причем с сохранением и дополнением позитивных качеств моделей низших уровней в моделях высших.

2. Модели разных уровней могут опираться на достаточно широкую базу данных экспериментальных исследований элементов штамповой оснастки.

3. Предложенная структура программно-модельного комплекса в целом отражает структуру комплексной математической модели.

4. Предложенная иерархическая структура математических моделей и программно-модельного комплекса соединяет: преемственность, адекватность, оперативность, параметричность, а также единый сквозной

подход.

5. В целом прогнозируются основные закономерности напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки – матриц, пуансонов, пуансон-матриц: локализация нагрузок, и, соответственно, напряжений в зоне режущих кромок.

6. Математическая модель наиболее высокого уровня, в отличие от остальных, дает возможность не только исследовать напряженно-деформированное состояние оснастки, но и напряженно-деформированное состояние заготовки, в том числе остаточное деформирование детали, форму ее кромки, усилие штамповки.

В дальнейшем планируется проведение многовариантных исследований напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки с варьированием наиболее важных и значимых конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров штампов.

Список литературы. 1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – М.: Машиностроение, 1979. – 520 с. 2. Скворцов Г.Д. Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1972. – 360 с. 3. Зяярненко Е.И. Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных переналаживаемых штампов. – Дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. – Харьков. – 1992. – 418 с. 4. Зяярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Расчеты на прочность вырубных матриц и пуансон-матриц для листовой штамповки // Кузнечно-штамповочное производство – 1990. – с.18-21. 5. Зяярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Исследование напряженного состояния вырубных пуансонов УСПШ // В сб.: Прогрессивная технология, переналаживаемая оснастка и инструмент. Материалы отраслевого научно-технического семинара. – Харьков. – 1985. – С.95-103. 6. Зяярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Исследование контактного взаимодействия пуансона со штампуемым материалом. – Вестник Оборонной Техники. Серия 2, 1985. – Вып.10(176). – С.20-23. 7. Зяярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Исследование напряженного состояния вырубных пуансонов УСПШ // В сб.: Прогрессивная технология, переналаживаемая оснастка и инструмент. Материалы отраслевого научно-технического семинара. – Харьков, 1985, С.95-103. 8. Артюхов В.П., Савченко В.И. Исследования распределения напряжений в рабочих элементах вырубных штампов методом фотоупругости. // Кузнечно-штамповочное производство, 1970. – № 11. – С.24-27. 9. Елистратов В.И. Исследование нормальных напряжений по торцу твердосплавных пуансонов при вырубке-пробивке. // Кузнечно-штамповочное производство, 1973. – № 8. – С.21-24. 10. Львов Г.И., Ткачук Н.А. Моделирование и анализ элементов технологических систем листовой штамповки // Механика та машинобудування. – 1997. – №1. – С.34-39. 11. Ткачук Н.А., Орлов Е.А., Головченко В.И., Гоголь Н.А. Экспресс – модели и экспресс – системы для оперативного решения задач анализа и синтеза элементов сложных механических систем // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Машинознавство та САПР”. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – № 53. – С.116-137. 12. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров.// Прикладная математика и механика. – 1977. – Том. 41. – с.329-337. 13. Львов Г.И. Взаимодействие упругопластической оболочки с жестким штампом // Прикладная механика. – 1980. – Том. 16. – № 11. 14. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с. 15. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с. 16. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х. Р., Гришук Л.Б., Куран Д.Р. Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 296 с. 17. Музеймек А.Ю., Богач А.А. Математическое моделирование процесса удара и взрыва в программе LS-DYNA: учебное пособие. – Пенза: Информационно издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.

Поступила в редакцию 25.04.06